

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



WEGMANN, et al Q76579  
METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING THE  
INFLUENCING OF THE STATE OF POLARIZATION BY  
AN OPTICAL SYSTEM, AND AN ANALYSER  
Filed: July 29, 2003  
SUGHRUE MION 202-293-7060  
2 of 2

## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 102 35 514.2

**Anmeldetag:** 29. Juli 2002

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing  
Technologies AG, Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der  
Polarisationszustandsbeeinflussung durch ein  
optisches System

**IPC:** G 01 J 4/04

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 11. April 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
im Auftrag

Agurk

**Anmelderin:**

Carl Zeiss Semiconductor  
Manufacturing Technologies AG  
Carl Zeiss Straße 22  
73447 Oberkochen

Unser Zeichen: P 41565 DE

29. Juli 2002 EW/so

## Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch ein optisches System

5 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung der von einem optischen System verursachten Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie auf eine zur Durchführung eines solchen Verfahrens geeignete Vorrichtung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 7.

10

Es sind verschiedene Verfahren und Vorrichtungen bekannt, mit denen bestimmt werden kann, wie ein optisches System den Polarisationszustand optischer Strahlung beeinflusst. Unter dem Begriff optisches System ist dabei jedwede Anordnung einer oder mehrerer Optikkomponenten zu verstehen, die einfallende optische Strahlung transmittieren und/oder reflektieren, insbesondere auch Linsen und damit aufgebaute Objektive. Unter dem Begriff optische Strahlung ist vorliegend eine beliebige elektromagnetische Strahlung zu verstehen, mit denen das untersuchte optische System beaufschlagt wird, z.B. sichtbares Licht oder UV-Strahlung. Besonders verbreitet sind Ellipsometrieverfahren und Ellipsometrievorrichtungen in diversen Ausprägungen. Zur Beschreibung

des Polarisationszustandes sowie dessen Beeinflussung bzw. Änderung durch das optische System dienen geeignete Größen, wie die Stokes-Parameter, die Müller-Matrix, die Polarisationsmatrix und die Jones-Matrix. Für diesbezügliche Details kann auf die einschlägige Literatur 5 verwiesen werden.

Ein Verfahren und eine Vorrichtung der eingangs genannten Art sind in der Patentschrift US 5.298.972 offenbart. Bei diesem Verfahren und dieser Vorrichtung wird die von einem optischen System verursachte 10 Beeinflussung des Polarisationszustands integral bestimmt, und zwar durch Bestimmung eines einzelnen, dem untersuchten optischen System zugeordneten Stokes-Parametersatzes und der daraus resultierenden Jones-Matrix. Die Strahlung wird über je eine Einmodenfaser auf die Optikkomponente gerichtet und von dieser abgeführt, wodurch eine 15 räumliche Strahlfilterung bewirkt wird.

Bekannt ist die Ausnutzung von Polarisationseffekten auch zur Erzeugung von Polarisationsbildern von Objekten. Die Patentschrift US 5.396.329 zeigt ein entsprechendes Bildaufnahmesystem, das zusätzlich zu einer Abbildungsoptik einen optischen Retarder z.B. in Form eines Kompensators und diesem nachgeschaltet einen Linearpolarisator aufweist, die beide drehbeweglich angeordnet sind. Als Bilddetektions- 20 einheit dient z.B. eine Bildkamera, ein CCD-Detektor oder eine Reihe einzelner Detektorelemente. Die rechnerische Auswertung erfolgt über 25 die Stokes-Parameter und je eine Müller-Matrix für jede polarisationsrelevante Komponente.

Die Patentschrift US 5.166.752 offenbart ein Ellipsometriesystem, bei dem ein paralleles Eintrittsstrahlenbündel auf ein untersuchtes optisches 30 System fokussiert wird, so dass die einzelnen Strahlen unter verschiedenen Winkeln einfallen, und der vom untersuchten optischen System reflektierte oder transmittierte Strahlenkegel in ein paralleles Austritts-

strahlenbündel refokussiert wird. Als Detektoreinheit dient eine Reihe von einzelnen Detektorelementen, auf die jeweils Lichtstrahlen auftreffen, die aus einem engen Bereich von Einfallswinkeln auf das untersuchte optische System stammen. Dies soll eine gleichzeitige Detektion des

5 Polarisationszustands von unter verschiedenen Einfallswinkeln auf das untersuchte System einfallenden Lichtstrahlen ermöglichen, ohne dass dazu ein abrasternder Detektionsvorgang notwendig ist. Mit diesem Ellipsometriesystem werden insbesondere Proben optischer Materialien auf Eigenschaften untersucht, die eine Polarisationszustandsänderung

10 hervorrufen, bei Messung in Transmission speziell die Doppelbrechung eines optischen Volumenmaterials.

Zur Ermittlung der Abbildungsgüte von hochpräzis abbildenden Optiken können bekanntermaßen Wellenfrontsensoren eingesetzt werden, mit

15 denen Abweichungen der bildseitigen Wellenfronten vom idealen Abbildungsverhalten sehr genau bestimmt werden können. Hierzu sind z.B. sogenannte Shearing-Interferometer im Gebrauch. Eine darauf basierende Wellenfront erfassungsvorrichtung ist in der Offenlegungsschrift DE 101 09 929 A1 offenbart. Diese Vorrichtung eignet sich insbesonde-

20 re auch zur Bestimmung der Abbildungsqualität von Projektionsobjektiven mikrolithographischer Projektionsbelichtungsanlagen und beinhaltet Mittel zur Bereitstellung einer Wellenfrontquelle, z.B. mit einem Lichtleiter und einer an dessen Ausgang angeordneten Lochmaske, in der Objektebene des untersuchten optischen Abbildungssystems und ein Beu-

25 gungsgitter in der zur Objektebene konjugierten Bildebene. Dem Beugungsgitter ist ein ortsauflösender Strahlungsdetektor nachgeschaltet, z.B. in Form eines CCD-Chips, wobei eine zwischenliegende Optik das vom Beugungsgitter erzeugte Interferogramm auf die Sensorfläche des Detektors abbildet. Diese Art von Wellenfrontsensorik kann das Abbil-

30 dungssystem mit derselben Strahlung untersuchen, die vom Abbildungssystem in seinem normalen Betrieb verwendet wird, und sie kann mit dem Abbildungssystem in einer Baueinheit integriert sein. Dieser

Wellenfrontsensortyp wird daher auch als Betriebsinterferometer (BIF) bezeichnet.

In der nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldung 102 17 5 242.0 wird eine Messvorrichtung beschrieben, die insbesondere eine derartige BIF-Vorrichtung sein kann und zur interferometrischen Vermessung eines optischen Abbildungssystems dient, das zur Abbildung eines an einer Maske vorgesehenen Nutzmusters in die Bildebene dient, wozu die Maske in der Objektebene angeordnet wird. Es wird vorgeschlagen, die Wellenfrontquelle für die interferometrische Vermessung 10 durch ein zusätzlich zum Nutzmuster an der Maske ausgebildetes Messmuster zu realisieren.

Bei modernen hochpräzisen Abbildungssystemen hoher numerischer 15 Apertur, wie sie z.B. als mikrolithographische Projektionsobjektive eingesetzt werden, ist der Einfluss des Abbildungssystems auf den Polarisationszustand der eingesetzten Strahlung kaum mehr zu vernachlässigen. So ergeben sich z.B. polarisationsbedingte Auswirkungen auf die Abbildungsqualität durch Doppelbrechung bei Linsen aus Calciumfluorid, 20 wie sie häufig für kurze Wellenlängen verwendet werden, und durch Polarisationseffekte an Umlenkspiegeln. Es besteht daher ein Bedarf, die Beeinflussung des Polarisationszustands von optischen Abbildungssystemen hoher Apertur möglichst gut quantitativ bestimmen zu können, um daraus Rückschlüsse auf die polarisationsabhängige Abbildungsqualität 25 zu ziehen.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines neuartigen Verfahrens und einer neuartigen Vorrichtung der eingangs genannten Art zugrunde, mit denen sich die von einem untersuchten optischen System verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands einer verwendeten Strahlung vergleichsweise genau bestimmen lässt, so dass sie sich insbesondere auch dafür eignen, bei optischen Abbil-

dungssystemen den polarisationsbedingten Einfluss auf die Abbildungsqualität sehr präzise zu ermitteln.

Die Erfindung löst dieses Problem durch die Bereitstellung eines Verfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und einer Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 7. Erfindungsgemäß ist das untersuchte optische System ein optisches Abbildungssystem vorgebbarer Apertur, dessen Beeinflussung des Polarisationszustands pupillenaufgelöst bestimmt wird. Unter dem Begriff „pupillenaufgelöst“ ist dabei eine winkelaufgelöste Bestimmung dieser Polarisationszustandsbeeinflussung über wenigstens einen Teil des durch die Apertur gegebenen Pupillenbereichs des optischen Abbildungssystems hinweg zu verstehen.

Die Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung erfolgt somit 15 pupillenaufgelöst für die einzelnen Koordinatenpunkte des berücksichtigten Pupillenbereichs und nicht als bloße integrale, örtlich nicht aufgelöste Messung. Dies erlaubt eine pupillenaufgelöste Untersuchung des optischen Abbildungssystems auf eventuelle optische Abbildungsfehler, die durch die Beeinflussung des Polarisationszustands bedingt sind. Ein 20 wichtiges Anwendungsgebiet ist die Untersuchung auf Abbildungsfehler bei hochpräzisen Projektionsobjektiven von Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen zur Waferbelichtung in der Halbleiterbauelementfertigung, wo sehr feine Strukturen z.B. mit UV-Strahlung von einer Maske auf einen Wafer zu übertragen sind.

25

In einer Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 2 wird in der Objekt ebene des Abbildungssystems ein definierter Eintritts-Polarisationszustand bereitgestellt und der Austritts-Polarisationszustand innerhalb eines vorgebbaren Pupillenbereichs des Abbildungssystems pupillenaufgelöst gemessen.

Eine Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 3 sieht vor, als ein-  
trittsseitige Strahlung eine von der Objektebene des Abbildungssystems  
ausgehende, räumlich inkohärente Punktlichtstrahlung bereitzustellen.  
Hierzu eignet sich eine nach Anspruch 8 weitergebildete Vorrichtung, die  
5 eine Lochblende mit einer oder mehreren Öffnungen in der Objektebene  
des Abbildungssystems und vorgeschaltete erste Polarisationsmittel um-  
fasst. Letztere können in Weiterbildung der Vorrichtung nach Anspruch 9  
eine Polarisatoreinheit und/oder in serieller Anordnung eine Kompensa-  
toreinheit beinhalten, die in verschiedenen räumlichen Orientierungen  
10 einstellbar sind. Dies kann durch Verwendung drehbarer Polarisatoren  
bzw. Kompensatoren oder von unterschiedlichen, zuschaltbaren opti-  
schen Kanälen mit voreingestellten Polarisator-/Kompensatoreinheiten  
realisiert sein. In weiterer Ausgestaltung kann die Vorrichtung gemäß  
Anspruch 10 eine Streuscheibe vor den ersten Polarisationsmitteln ent-  
15 halten.

Eine nach Anspruch 11 weitergebildete Vorrichtung weist als Polarisati-  
onsdetektormittel einen CCD-Detektor und vorgeschaltete zweite Polari-  
sationsmittel auf. Die so ausgelegten Polarisationsdetektormittel ermög-  
20 lichen die simultane pupillenaufgelöste Messung des Austritts-  
Polarisationszustands für alle Ortskoordinaten des betrachteten Pupil-  
lenbereichs in einem einzigen Messvorgang ohne Notwendigkeit eines  
alternativ möglichen Scannens, d.h. Abrasters, des Pupillenbereichs  
durch einen punktförmig messenden Detektor.

25 Bei einem nach Anspruch 4 weitergebildeten Verfahren beinhaltet die Auswertung des Austritts-Polarisationszustands eine Ermittlung der phasenreduzierten Jones-Matrix aus einer ellipsometrischen Messung der Polarisationszustandsbeeinflussung.

30 Bei einer Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 5 wird der pupil-  
lenaufgelöste, räumliche Verlauf der austrittseitigen Wellenfrontphase

durch Shearing-Interferometrie ermittelt. In Verbindung mit einer Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix z.B. nach dem Verfahren von Anspruch 4 kann daraus die vollständige, pupillenaufgelöste Jones-Matrix des optischen Abbildungssystems bestimmt werden. In diesem

5 Fall verfügen die Polarisationsdetektormittel der verfahrensdurchführenden Vorrichtung in einer Weiterbildung nach Anspruch 12 eine entsprechende Shearing-Interferometereinheit.

Bei einem nach Anspruch 6 weitergebildeten Verfahren wird die aus-

10 trittsseitige Strahlung durch Shearing-Interferometrie mit einer Polarisationsanalyse zur pupillenaufgelösten Bestimmung von Betrag und Phase der Matrixelemente der Jones-Matrix verknüpft.

Für die Durchführung der Verfahrensvarianten mit Bestimmung der pha-

15 senreduzierten oder vollständigen, pupillenaufgelösten Jones-Matrix ist die Auswerteeinheit der verfahrensdurchführenden Vorrichtung in einer Weiterbildung nach Anspruch 13 entsprechend ausgelegt.

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den Zeichnungen

20 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Seitenansicht einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer zugeordneten Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands durch ein Projektionsobjektiv mittels ellipsometrischer Messung,

Fig. 2 eine Darstellung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage entsprechend Fig. 1, jedoch mit einer Vorrichtungsvariante zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands, die eine Shearing-Interferometereinheit beinhaltet,

Fig. 3 eine Schemadarstellung zur Erläuterung von Zweistrahlerferometrie im Jones-Matrix-Kalkül, wie sie der Funktionsweise der Vorrichtung gemäß Fig. 2 zugrunde liegt, und

5 Fig. 4 eine Darstellung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage entsprechend Fig. 2, jedoch für eine Vorrichtungsvariante mit zusätzlichen Polarisationsanalysatormitteln an der Austrittsseite der Shearing-Interferometereinheit.

10 Fig. 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer zugeordneten Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch den abbildenden Systemteil. Die Projektionsbelichtungsanlage beinhaltet in üblicher Weise ein Beleuchtungssystem 1 als denjenigen Systemteil, der die 15 gewünschte Strahlung liefert, z.B. UV-Strahlung im Wellenlängenbereich um 248nm oder 193nm, und ein nachgeschaltetes Projektionsobjektiv 2 als abbildenden Systemteil. Der insoweit herkömmliche Aufbau ist um Komponenten einer Vorrichtung erweitert, mit welcher die vom Projektionsobjektiv 2 verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands der 20 verwendeten optischen Strahlung durch eine sogenannte numerische Apertur(NA)-Messtechnik mit Ellipsometerfunktion ergänzt ist. Speziell eignet sich diese Vorrichtung zur Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix ortsauflöst über den Pupillenbereich des Projektionsobjektivs 2 hinweg, bei dem es sich um ein optisches Abbildungssystem 25 mit vergleichsweise hoher Apertur handelt.

Zwischen Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 beinhaltet die Vorrichtung Mittel zur Bereitstellung eintrittsseitiger Strahlung für das Projektionsobjektiv 2 mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand. Diese 30 beinhalten im Strahlengang hintereinander eine Streuscheibe 3, einen drehbaren Polarisator 4, einen drehbaren Kompensator 5 (optional), eine Spotlinse und eine Lochmaske 7 mit einer oder mehreren Öffnun-

gen. Durch die ausreichend stark streuend ausgelegte Streuscheibe 3 wird in ausreichendem Maß räumlich inkohärente Strahlung bereitgestellt. Die Lochmaske 7 ist in der Brennebene der weitestgehend homogen ausgeleuchteten Spotlinse 6 angeordnet, die gleichzeitig die Objektebene des Projektionsobjektivs 2 bildet. Dies ergibt eine räumlich möglichst inkohärente Punktlichtquelle in der Objektebene. Dem Projektionsobjektiv 2 ist ein Mikroskopobjektiv 8 nachgeschaltet, dessen Brennebene mit der Bildebene des Projektionsobjektivs 2 zusammenfällt und eine numerische Apertur aufweist, die mindestens so groß wie diejenige des untersuchten Projektionsobjektivs 2 ist. Somit bildet das Mikroskop-Objektiv 8 einen Objektpunkt in der Ebene der Lochmaske 7 nach unendlich ab, d.h. in einen reellen parallelen Strahlengang. Durch eine geeignete niederaperturige Relais-Optik 9, z.B. eine 4f-Optik, wird ein scharfes Bild der Intensitätsverteilung des parallelen Strahlenbündels auf einem Detektorelement 10 erzeugt, bei dem es sich z.B. um einen CCD-Chip einer Bildkamera handelt.

Insoweit bilden die erwähnten Komponenten eine NA-Messapparatur, mit der bei bekannter, vorgegebener winkelabhängiger Emission der Spotlinsen-Lochmasken-Einheit 6, 7 und bei bekannter, vorgegebener winkelabhängiger Transmission der Mikroskop-Relaisoptik-Einheit 8, 9 die Transmission des Projektionsobjektivs 2 über deren gesamten Pupillenbereich hinweg ortsaufgelöst bestimmt werden kann. Die Emissionsverteilung der Beleuchtung kann z.B. vorab durch winkelvariable Abtastung mittels einer goniometrisch aufgehängten Messdiode bestimmt werden. Eine Kalibrierung der Mikroskopeinheit ist durch rückseitige Durchstrahlung mit einem Parallelbündel bekannter Intensitätsverteilung und wiederum Abtastung des fokalen Aperturkegels mit einer goniometrischen Messvorrichtung möglich. Die abrasternde Methode mit goniometrischer Messvorrichtung ist zwar an sich auch für die vorliegend interessierende Untersuchung des Projektionsobjektivs 2 möglich, der Vorteil der hier beschriebenen Vorgehensweise ist jedoch, dass mit ei-

ner so kalibrierten Vorrichtung viele Feldpunkte des Projektionsobjektivs 2 quasi gleichzeitig bzw. jedenfalls in relativ kurzer Zeit vermessen werden können.

- 5 Durch Hinzufügen geeigneter polarisationsoptischer Komponenten erhält diese NA-Messapparatur eine Ellipsometerfunktion, die eine pupillenaufgelöste Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix für das Projektionsobjektiv 2 ermöglicht. Dazu dienen zum einen der drehbare Polarisator 3 und der drehbare Kompensator 5 auf der Eintritts- bzw. Beleuchtungsseite des Projektionsobjektivs 2 und zum anderen ein austrittsseitiger drehbarer Kompensator 11 und diesem nachgeschaltet ein austrittsseitiger Polarisator 12 zwischen der Relais-Optik 9 und dem CCD-Detektor 10. Die Kalibrierung des Beleuchtungsteils 6, 7 und der Mikroskopeinheit 8 kann durch goniometrisches Abtasten der betreffenden Aperturkegel mittels einer herkömmlichen Ellipsometereinheit erfolgen. Dabei werden die zugehörigen parallelen Strahlengänge durch die Polarisator- und Kompensatoranordnung als mindestens vier linear unabhängige Polarisationszustände vorgegeben.
- 10
- 15
- 20 Speziell können dann beleuchtungsseitig nacheinander vier unterschiedliche Polarisationszustände eingestellt werden, die vier linear unabhängigen Stokes-Vektoren entsprechen, und ausgangsseitig können die resultierenden Stokes-Vektoren der vom Projektionsobjektiv 2 transmittierten Strahlung gemessen werden. Aus den eintrittsseitigen und austrittsseitigen Stokes-Vektoren ergibt sich nach bekannten Beziehungen die Müller-Matrix, aus der wiederum die phasenreduzierte Jones-Matrix abgeleitet werden kann, wie aus der einschlägigen Literatur bekannt.
- 25

- 30 Diese Auswertung erfolgt durch eine in Fig. 1 lediglich schematisch in Ankopplung an den CCD-Detektor 10 gezeigte Auswerteeinheit 13, die zu diesem Zweck geeignet ausgelegt ist. Die der Projektionsbelichtungsanlage mit Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 zuge-

ordnete Vorrichtung ermöglicht somit eine simultane zweidimensionale Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix pupillenaufgelöst, d.h. die Elemente der Jones-Matrix und damit die polarisierende Eigenschaft des Projektionsobjektivs 2 werden ortsaufgelöst über den Pupillenbereich des hochaperturigen Projektionsobjektivs 2 hinweg als Funktion der Pupillenkoordinate bestimmt.

5 Dadurch kann der Einfluss des Projektionsobjektivs 2 auf den Polarisationszustand der auf einen Wafer gerichteten Belichtungsstrahlung rasch

10 und genau bestimmt werden. Dieser Einfluss nimmt bei modernen mikrolithographischen Projektionsobjektiven mit hoher numerischer Apertur an Bedeutung zu, beispielsweise wegen Doppelbrechungseffekten bei den für kurze Wellenlängen verwendeten Calciumfluoridlinsen und wegen Polarisationseffekten durch Umlenkspiegel. Die 15 ortsaufgelöste Kenntnis dieser Einflüsse des Projektionsobjektivs auf den Polarisationszustand der Strahlung kann dann geeignet dazu genutzt werden, ein gewünschtes Abbildungs-/Belichtungsverhalten der Projektionsbelichtungsanlage zu erzielen.

20 Fig. 2 zeigt eine Variante der Anordnung von Fig. 1, wobei der Übersichtlichkeit halber für funktionell gleiche Elemente dieselben Bezugssymbole gewählt sind und insoweit auf die obige Beschreibung des Beispiels von Fig. 1 verwiesen werden kann. Insbesondere handelt es sich auch im Beispiel von Fig. 2 um eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2, dessen polarisierende Eigenschaft durch eine zugeordnete Vorrichtung untersucht wird, wobei der Aufbau zwischen Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 demjenigen von Fig. 1 entspricht.

25 30 Wie erwähnt, wird durch die Vorrichtung von Fig. 1 die pupillenaufgelöste Jones-Matrix phasenreduziert bestimmt, d.h. bis auf einen globalen, pupillenortsabhängigen Phasenterm. Die im Ausführungsbeispiel von

Fig. 2 verwendete Vorrichtung ist in der Lage, diesen globalen Phasenterm durch eine Shearing-Interferometriemesstechnik bei definiertem Eintritts-Polarisationszustand zu ermitteln. Dazu beinhaltet diese Vorrichtung an der Austrittsseite des untersuchten Projektionsobjektivs 5 14 eine Shearing-Interferometereinheit 14, an die sich der CCD-Detektor 10 anschließt. An letzteren ist eine geeignet ausgelegte Auswerteeinheit 13a angekoppelt.

Die Shearing-Interferometereinheit ist von einem an sich herkömmlichen Aufbau, wie er z.B. in der oben erwähnten DE 101 09 929 A1 und der ebenfalls oben erwähnten älteren deutschen Patentanmeldung 102 17 242.0 beschrieben ist, worauf für weitere Details verwiesen werden kann. In der Auswerteeinheit 13a sind die benötigten Steuerungs- und Auswerteprozesse implementiert, wie sich dies für den Fachmann aus 15 der vorliegenden Beschreibung der zugehörigen Prozessschritte ohne weiteres ergibt. Zur Erläuterung ist in Fig. 3 schematisch die zugrunde liegende Zweistrahl-Interferometrie im Jones-Matrix-Kalkül dargestellt. Demgemäß ergibt sich die austrittsseitige Strahlungsintensität für die Überlagerung zweier Felder, die durch eine originale Jones-Matrix  $T$  und 20 eine um  $\Delta x$  verschobene Jones-Matrix  $T_\Delta$  repräsentiert werden, aus der Spurbildung eines Matrixprodukts der Summenmatrix  $T+T_\Delta$  mit der Eintritts-Polarisationsmatrix  $P_{in}$  und der hermitisch konjugierten Summenmatrix  $(T+T_\Delta)^+$ . Wenn die originale und die verschobene Jones-Matrix  $T$  bzw.  $T_\Delta$  jeweils bis auf einen konstanten Phasenfaktor bekannt sind, 25 kann ihre Phasendifferenz  $\Delta\alpha$  aus der Beziehung

$$\exp[i\Delta\alpha] = Q / \text{Spur} [TP_{in}T_\Delta^+]$$

ermittelt werden, wobei  $Q = \text{Spur} [TP_{in}T_\Delta^+]$  und  $T$  sowie  $T_\Delta$  die phasenreduzierte originale bzw. verschobene Jones-Matrix bezeichnen. Die im allgemeinen komplexe Zahl  $Q$  kann messtechnisch durch die Shearing-Interferometereinheit 14 aus Amplitude und Phase des Modulationssig- 30

nals unter Verwendung der Phasenschiebetechnik gewonnen werden.

Da der vorliegend betrachtete Einsatz der Shearing-Interferometrie die Verwendung derselben Strahlung erlaubt, die im eigentlichen Nutzbe-

trieb des Polarisationsobjektivs 2 benutzt wird, wird diese Messtechnik

5 auch als Betriebsinterferometer(BIF)-Messtechnik bezeichnet.

Durch eine Integration lässt sich dann der räumliche Verlauf der Phase  $\alpha(x)$  über die Pupillenkoordinate  $x$  ermitteln. Dies ermöglicht die Be-

stimmung der vollständigen Jones-Matrix für das Projektionsobjektiv 2,

10 wenn die phasenreduzierte Jones-Matrix bereits bekannt ist, z.B. aus der ellipsometrischen NA-Messung mit der Vorrichtung von Fig. 1. Vor-

aussetzung ist lediglich, dass der Polarisationszustand der Beleuchtung,

d.h. an der Eintrittsseite des Projektionsobjektivs 2, bei der BIF-Messung von Fig. 2 vollständig bekannt ist, wobei er auch vollständig unpolarisiert

15 sein darf. Im Beispiel von Fig. 2 wird der definierte, vollständig polarisierte eintrittsseitige Strahlungszustand durch die Verwendung des eintritts-

seitigen Polarisators 4 und des optionalen eintrittsseitigen Kompensa-

tors 5 bewirkt.

20 Da aus der komplexen Zahl  $Q = \text{Spur}(TP_{in}T_{\Delta}^+)$  als solches nicht auf die einzelnen Jones-Matrixelemente geschlossen werden kann, erlaubt die Vorrichtung gemäß Fig. 2 allein keine Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix. Dies ermöglicht hingegen die Anordnung gemäß Fig.

4, die gegenüber derjenigen von Fig. 2 dahingehend modifiziert ist, dass

25 zwischen der Shearing-Interferometereinheit 14 und dem CCD-Detektor 10 ein drehbarer Polarisator 15 vorgesehen ist. Dafür wird im Beispiel von Fig. 4 auf den optionalen eintrittsseitigen Kompensator des Bei- spiels von Fig. 2 verzichtet. Im übrigen entsprechen sich die beiden Aus- führungsbeispiele in ihrem Aufbau.

30

Durch den eintrittsseitigen drehbaren Polarisator 4 und den austrittssei- tigen drehbaren Polarisator 15 können bei der Vorrichtung von Fig. 4 die

einzelnen Elemente der Jones-Matrix herausprojiziert werden. So ergibt sich für die Spur  $Q$  bei eintritts- und austrittsseitiger Einstellung eines in  $x$ -Richtung linear polarisierten Zustands der Wert  $T_{xx}T_{\Delta xx}^+$ . Mit dem Ansatz  $T_{xx}=a \cdot \exp[i\phi]$  für das Matrixelement  $T_{xx}$  ergibt dies für den mess-

5 technisch durch die Shearing-Interferometereinheit 14 bestimmbaren Spurwert  $Q$  die Beziehung

$$Q = a(a+\Delta a)\exp[-i\Delta\phi]$$

10 und somit einen differentiellen Ausdruck für den Betrag  $a(a+\Delta a)$  und die Phase  $-i\Delta\phi$ , so dass sich das Jones-Matrixelement  $T_{xx}$  durch numerische Integration über die Pupillenkoordinate bestimmen lässt. Dabei ist die Phasenfläche  $\phi$  nur bis auf eine für alle Pupillenorte gleiche Integrationskonstante bestimmt.

15 In gleicher Weise können durch Einstellen eines in  $y$ -Richtung linear polarisierten Eintritts- bzw. Austrittszustand die anderen Matrixkomponenten  $T_{yx}$ ,  $T_{xy}$  und  $T_{yy}$  und damit die gesamte phasenreduzierte Jones-Matrix ermittelt werden. Die vier Jones-Matrixelemente werden mit Betrag und Phase als Funktion der Pupillenkoordinate bestimmt, die vier zugehörigen Phasenflächen stehen jedoch in keiner definierten Beziehung zueinander, weil ihre Integrationskonstanten nicht bekannt sind. Dem kann z.B. dadurch abgeholfen werden, dass für wenigstens einen Punkt des Pupillenbereichs eine ellipsometrische Messung durchgeführt 20 wird, deren Messergebnis die fehlende Beziehung zwischen den vier Phasenflächen herstellt. Hierfür genügt eine Messung mit einem kommerziellen, einachsigen Ellipsometer, z.B. entlang der optischen Achse 25 des Projektionsobjektivs 2.

30 Wie die oben erläuterten Ausführungsbeispiele deutlich machen, ermöglicht die Erfindung mit vertretbarem Aufwand eine sehr genaue und rasche Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands von

Strahlung durch ein Abbildungssystem mittels NA-Messtechnik in Kombination mit Ellipsometrie und/oder durch eine Shearing-Interferometer-technik mit oder ohne austrittsseitigem Polarisationsanalysator. Dabei leistet die Erfindung insbesondere eine pupillenaufgelöste Bestimmung

5 der Beeinflussung des Polarisationszustands als Funktion der Pupillenkoordinate auch für hochaperturige Abbildungssysteme, wie moderne Projektionsobjektive von Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen. Es versteht sich, dass die Erfindung außer für solche Projektions-

10 objektive auch für beliebige andere optische Abbildungssysteme anwendbar ist, deren Einfluss auf den Polarisationszustand ortsaufgelöst erfasst werden soll.

- - - - -

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, bei dem
  - auf das optische System eintrittsseitige Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand gerichtet wird,
  - der Austritts-Polarisationszustand von aus dem optischen System austretender Strahlung gemessen wird und
  - die Polarisationszustandsbeeinflussung durch das optische System mittels Auswertung des gemessenen Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand bestimmt wird,  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - die durch ein optisches Abbildungssystem vorgebbarer Apertur verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands pupillenaufgelöst bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter dadurch gekennzeichnet, dass der definierte Eintritts-Polarisationszustand in einer Objektebene des Abbildungssystems bereitgestellt wird und der Austritts-Polarisationszustand innerhalb eines vorgebbaren Pupillenbereichs des Abbildungssystems pupillenaufgelöst gemessen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, weiter dadurch gekennzeichnet, dass als eintrittsseitige Strahlung eine von der Objektebene des Abbildungssystems ausgehende, räumlich inkohärente Punktlichtstrahlung bereitgestellt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Auswertung eine Ermittlung der phasenre-

duzierten Jones-Matrix beinhaltet und eine zugehörige ellipso-metrische Messung durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Bereitstellung des definierten Eintritts-Polarisationszustands, die Messung des Austritts-Polarisationszustands und die Auswertung eine Shearing-Interferometriemessung beinhalten.
6. Verfahren nach Anspruch 5, weiter dadurch gekennzeichnet, dass das Ergebnis der Shearing-Interferometriemessung einer nachgeschalteten Polarisationsanalyse unterzogen wird.
7. Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, mit
  - Mitteln (1 bis 7) zur Bereitstellung von auf das optische System gerichteter, eintrittsseitiger Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand,
  - Polarisationsdetektormitteln (8 bis 12; 14, 15) zur Messung des Austritts-Polarisationszustands von aus dem optischen System austretender Strahlung und
  - einer Auswerteeinheit (13, 13a) zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch das optische System mittels Auswertung des gemessenen Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand,  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - die Polarisationsdetektormittel (8 bis 12; 14, 15) zur pupillenaufgelösten Messung des Austritts-Polarisationszustands eingerichtet sind und
  - die Auswerteeinheit (13, 13a) zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung eingerichtet ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Bereitstellung der eintrittsseitigen Strahlung eine Lochmaske (7) in einer Objektebene des Abbildungssystems (2) und vorgeschaltete erste Polarisationsmittel (4, 5) beinhalten.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die ersten Polarisationsmittel eine Polarisatoreinheit (4) und/oder in serieller Anordnung eine Kompensatoreinheit (5) beinhalten, die in verschiedenen räumlichen Orientierungen einstellbar sind.
10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Bereitstellung der eintrittsseitigen Strahlung eine Streuscheibe (3) vor den ersten Polarisationsmitteln beinhalten.
11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsdetektormittel einen CCD-Detektor (10) und vorgeschaltete zweite Polarisationsmittel (11, 12; 15) beinhalten.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 11, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsdetektormittel eine Shearing-Interferometereinheit (14) beinhalten.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 12, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (13, 13a) zur Bestimmung der phasenreduzierten oder vollständigen, pupillenaufgelösten Jones-Matrix eingerichtet ist.

Zusammenfassung

1. Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch ein optisches System.

5

2.1. Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, wobei auf das optische System Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand gerichtet wird, der austrittsseitige Polarisationszustand gemessen und die Beeinflussung des Polarisationszustands durch das optische System mittels Auswertung des Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand bestimmt wird.

15

2.2. Erfindungsgemäß werden das Verfahren und die Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein optisches Abbildungssystem vorgebbarer Apertur angewendet, wobei die Bestimmung pupillenaufgelöst erfolgt.

20

2.3. Verwendung z.B. zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands von UV-Strahlung durch ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage.

25

3. Fig. 1.

-----

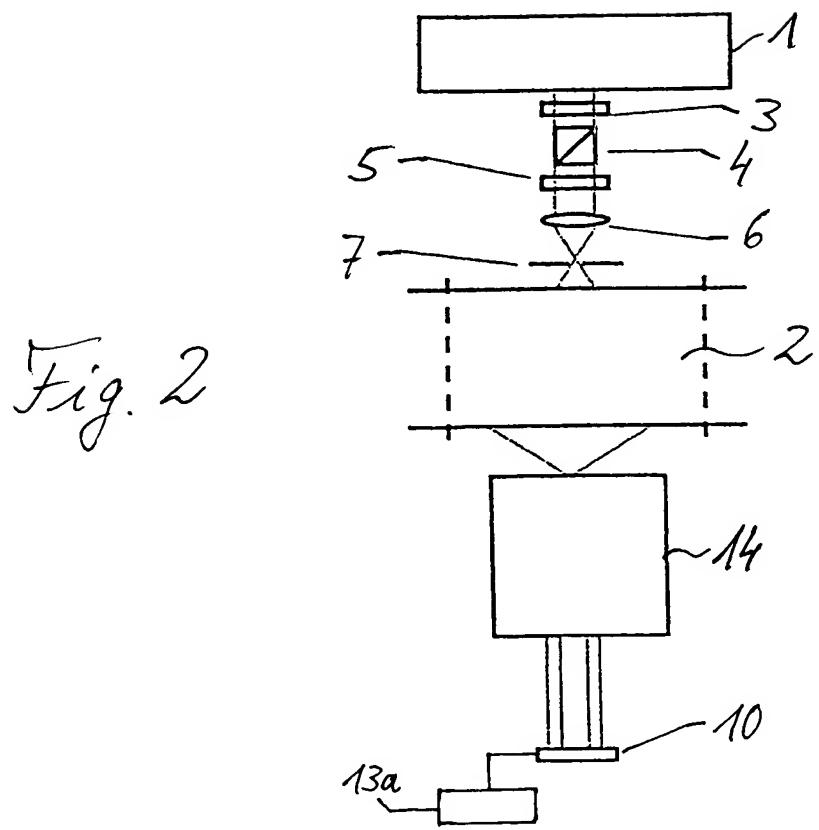
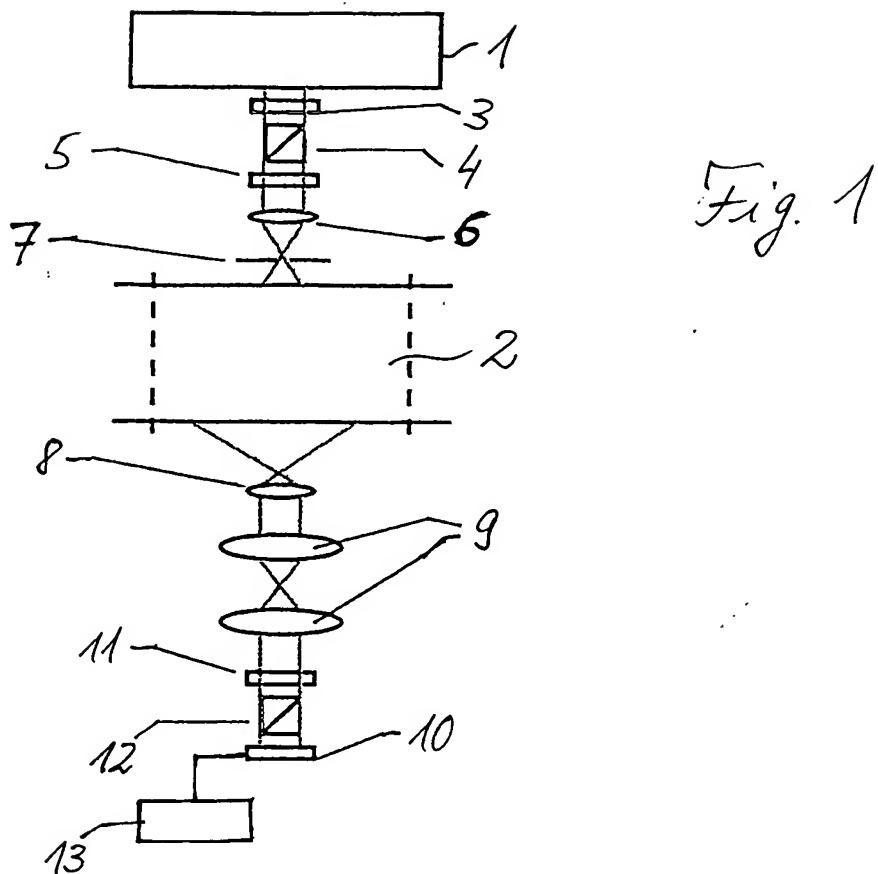


Fig. 3

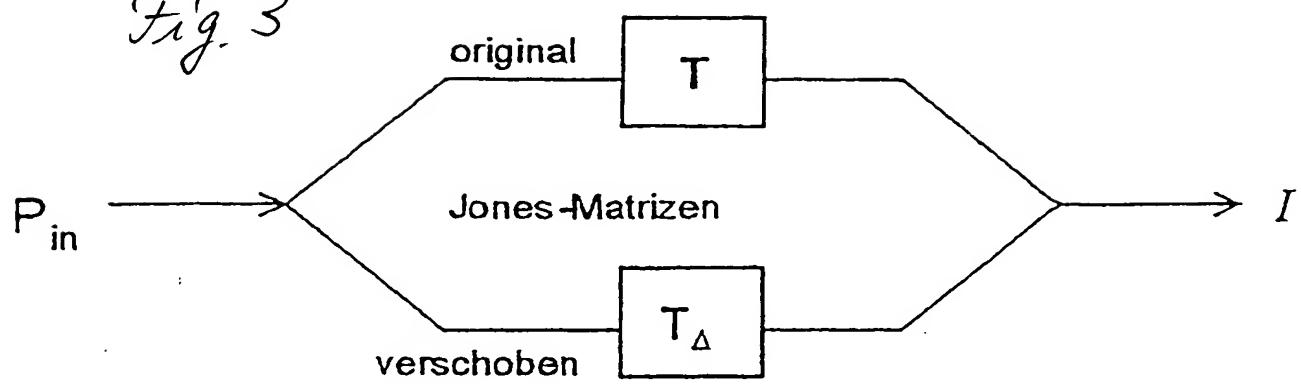
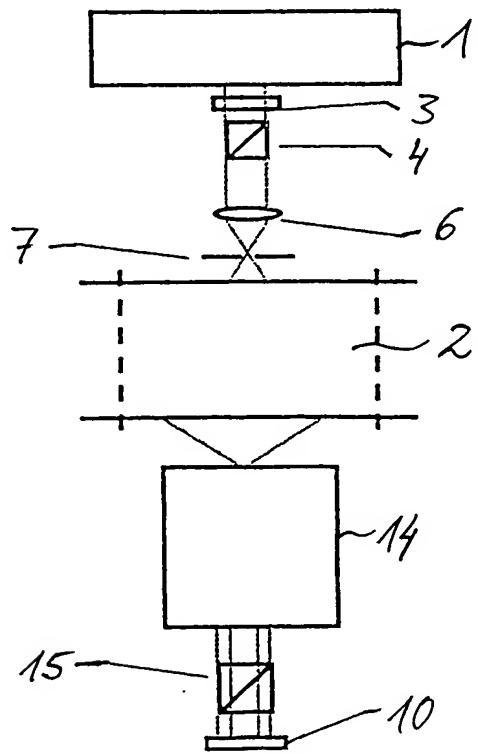


Fig. 4



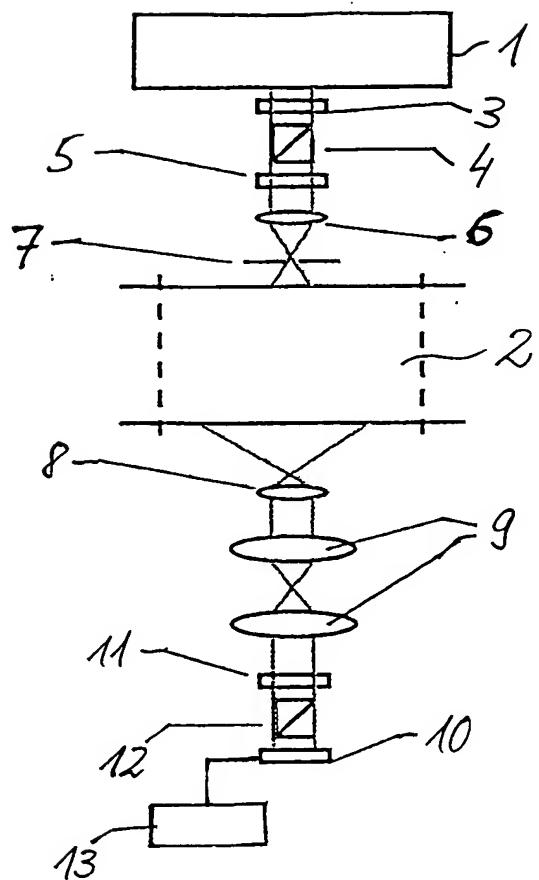


Fig. 1